


主编 褚君浩 张玉龙

Semiconductor

Material
Technology

半导体 材料技术

 浙江出版联合集团
浙江科学技术出版社

Material
Technology

半导体材料技术

主编 褚君浩 张玉龙



浙江出版联合集团
浙江科学技术出版社

书 名 半导体材料技术
主 编 褚君浩 张玉龙

出版发行 浙江科学技术出版社
杭州市体育场路 347 号 邮政编码: 310006
联系电话: 0571-85170300-61709
E-mail: myy@zkpress.com

排 版 杭州大漠照排印刷有限公司
印 刷 浙江新华数码印务有限公司
经 销 全国各地新华书店

开 本	787×1092 1/16	印 张	27
字 数	592 000		
版 次	2010 年 2 月第 1 版		2010 年 2 月第 1 次印刷
书 号	ISBN 978-7-5341-3748-8	定 价	95.00 元

版权所有 翻印必究

(图书出现倒装、缺页等印装质量问题,本社负责调换)

责任编辑	莫亚元 罗 瑾	装帧设计	孙 菁
责任校对	张 宁	责任印务	田 文

编 委

主任委员：

任陵柏 梁培康

副主任委员：

唐 磊 周六辉 黄 晖 李旭东

主 编：

褚君浩 张玉龙

副主编：

黄 晖 王 明 官周国 刘善喜 杜仕国

编 委：（按姓氏笔画排序）

马振锋 王 明 王 勇 王 莉 王智忠
王国义 毛儒炎 孔祥海 朱柏林 任陵柏
刘 华 刘志成 刘宝玉 刘莲英 刘善喜
齐贵亮 闫 军 孙聂枫 杜仕国 李 忠
李 胜 李 萍 李旭东 李桂变 李惠元
李锦科 李新开 杨 耘 杨振强 吴子波
吴建全 张玉龙 邵颖惠 金川川 周六辉
庞丽萍 官周国 赵宏文 赵媛媛 侯京陵
唐 磊 黄 晖 曹根顺 康 敏 梁培康
梁崇学 路香兰 解植文 褚君浩 蔡志勇

内容摘要

本书较为详细地介绍了以硅、锗为代表的第一代半导体材料,以砷化镓和磷化铟为代表的第二代半导体材料,以耐高温化合物为代表的宽禁带第三代半导体材料以及以量子阱、量子线和量子点为代表的第四代半导体材料,还介绍了半导体陶瓷和有机半导体材料的基础知识、制备技术、性能特性和应用,是半导体行业和微电子工业材料研究、器件设计与制备、管理、销售和教学人员的必读之书,也是半导体爱好者和自学者良好的自学教材。

前 言

半导体材料技术是微电子技术和信息技术发展的物质基础,没有硅材料和硅集成芯片的问世,就没有当今的电子技术;没有砷化镓材料的技术突破、超晶格和量子材料的研制成功以及半导体激光器和超高激光器件的发展,就没有今天先进的移动通信和数字化高速信息网技术。随着半导体技术的发展以及高新技术的应用,我们可以预测,基于量子效应的低维半导体材料、半导体陶瓷和有机半导体材料的研究与应用的发展,必将触发新的技术革命,并将深刻影响世界政治、经济、军事对抗的格局,彻底改变人类的生产和生活方式,推动人类社会进入新纪元。

为了普及半导体材料的基础知识,宣传推广半导体材料技术近年来的研究发展及应用成果,我们组织编写了《半导体材料技术》一书。全书共7章33节,较为全面地介绍了以硅、锗为代表的第一代半导体材料,以砷化镓和磷化铟为代表的第二代半导体材料,以耐高温化合物为代表的宽禁带第三代半导体材料和以量子阱、量子线及量子点为代表的第四代半导体材料,还介绍了半导体陶瓷和有机半导体材料的基本特点、制备技术、性能分析及应用技术等

内容,并对半导体材料技术的基本理论、基础知识、发展现状和趋势作了简要论述。该书是半导体行业和微电子工业材料研究、器件设计与制备、管理、销售和教学人员的必读之书,也是半导体爱好者和自学者良好的自学教材。

本书突出实用性、先进性和可操作性的特点,理论叙述从简,侧重于用实例和实用数据说明问题,由浅入深、循序渐进,且图文并茂。本书的出版将对我国半导体行业的发展与技术创新起到一定的促进作用。

由于作者水平有限,文中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

褚君浩

2009年12月

目 录

第 1 章 概述	1
1.1 简介	1
1.2 基础理论	2
1.3 半导体材料的研究与发展	11
第 2 章 硅、锗及其外延半导体材料	20
2.1 简介	20
2.2 硅	23
2.3 锗	90
2.4 硅锗(SiGe)异质结构半导体材料	98
第 3 章 化合物半导体材料	110
3.1 简介	110
3.2 砷化镓(GaAs)	111
3.3 磷化铟(InP)	131
3.4 磷化镓(GaP)	141
3.5 砷化铟(InAs)	147
3.6 锑化铟(InSb)	150
3.7 硫化铅(PbS)	156
3.8 砷镓铟(InGaAs)	158
第 4 章 宽禁带半导体材料	163
4.1 碳化硅(SiC)	163
4.2 氮化镓(GaN)	180
4.3 氧化锌(ZnO)	195
4.4 硫系非晶体态半导体材料	213
第 5 章 低维半导体材料	225
5.1 简介	225
5.2 量子阱材料	236

5.3	量子线	245
5.4	量子点材料	272
第 6 章	陶瓷半导体材料	290
6.1	简介	290
6.2	热敏陶瓷	295
6.3	压敏陶瓷	302
6.4	气敏陶瓷	318
6.5	湿敏陶瓷	330
6.6	多功能敏感陶瓷	345
第 7 章	有机半导体材料	351
7.1	简介	351
7.2	有机高分子半导体材料	361
7.3	有机小分子半导体材料	388
7.4	有机晶体半导体材料	412
参考文献	420

第 1 章 概 述

1.1 简 介

1.1.1 基本概念与范围

人们通常把物质分为三类：把导电、导热性比较好的金属材料（如金、银、铜、铁、锡等）称为导体；把导电、导热性差的材料（如塑料、橡胶、陶瓷、金刚石、人工晶体、琥珀等）称为绝缘体；把介于导体与绝缘体之间的物质称为半导体。半导体主要包括以单晶硅与多晶硅及其外延材料锗为代表的第一代晶体；以 GaAs 和 InP 为代表的第二代半导体材料；以氮化镓、碳化硅和氧化锌为代表的宽带隙耐高温第三代半导体材料以及低维半导体材料，即纳米半导体材料；以敏感陶瓷为代表的陶瓷半导体材料以及有机半导体材料等。

1.1.2 分类

半导体种类繁多，分类方法也不尽相同，现仅介绍几种常见的分类方法：

- (1) 按化学成分分类可分为元素半导体和化合物半导体等。
- (2) 按体内是否掺杂杂质分类可分为本征半导体和掺杂半导体等。
- (3) 按导电类型分类可分为 N 型半导体和 P 型半导体等。
- (4) 按材料类型分类可分为晶体半导体、陶瓷半导体和有机半导体等。

为叙述方便，本书将按材料类型分类，并分别加以论述。

1.1.3 基本特点

半导体是一种电子-空穴导体，在室温下其电阻率介于导体和

绝缘体之间,约为 $10^{-4} \sim 10^8 \Omega \cdot m$ 。半导体的主要特点不仅表现在其电阻率与导体和绝缘体的差别上,在导电特性上也具有两个显著的特点:

(1) 半导体的电导率对材料纯度极为敏感。例如,百万分之一的硼含量就能使纯硅的电导率成万倍地增加。如果所含杂质的类型不同,则导电类型也不同(如电子导电或空穴导电)。

(2) 电阻率受外界条件(如热、光等)的影响很大,温度升高或受光照射时均会使电阻率迅速下降。一些特殊的半导体在电场或磁场的作用下,电阻率也会发生变化。

1.1.4 应用

利用半导体对热、磁、力、光等物理量敏感的性能,可制作各种物理量的传感器,如热敏电阻、磁敏电阻、力敏电阻、光敏电阻及光电池等;利用半导体的载流子受电场和光的影响等特性,可制作晶体二极管、晶体三极管以及集成电路和光电子器件等。因此,半导体材料在电子工业中占有极为重要的地位,它曾促使电子工业产生巨大的变革,并且随着新材料、新功能的不断开发,必将获得更为广泛的应用。

1.2 基础理论

1.2.1 半导体的能带理论

电子在原子中的运动状态是由主量子数 n 、副量子数 l 、磁量子数 m 以及自旋量子数 m_s 决定的,并且可以用能级来描绘电子可能的运动状态。例如,锗原子中电子的分布情况可以用 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$ 来描述(图 1-1),最里边的电子壳层 ($n=l, l=0$) 有两个电子,第二个电子壳层有两个分层 ($n=2, l=0, 1$), 分别有 2 个和 6 个电子,依此类推,其能级大致如图 1-2 所示。对应于不同的电子壳层,能级之间的能量差较大,而对应于同一电子壳层的不同分层,能级之间的能量差较小。在锗原子中,第一、第二和第三电子壳层是被电子填满的,与电子核距离较近,结合也较牢固,称为内(层)电子;第四电子壳层未填满电子,距离原子核较远,结合也最弱。

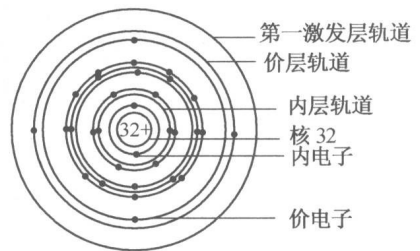


图 1-1 锗原子的电子壳层示意图

在未填满电子的最外壳层中,电子数的多少决定了这一元素的化学性质,这些电子称为价电子,价电子所处的基态能级叫价(能)级。价电子经激发后,可以跃迁到价(能)级以上的空能级中去,这些空能级叫激发级(对应于激发层轨道)。为简单起见,在图 1-2 中,价级只画了一条横线来表示。图中最上方是游离级,表示电子处于可以自由运

动的游离状态。

在晶体中,如果认为各个原子是完全孤立的,那么各原子的相应能级的能量应完全相等。换句话说,相应的能级重叠在一起,成为简并能级。但事实上,当原子结合为晶体时,每一原子中的价电子除受本身原子核及内层电子的作用外,还受到其他原子的作用。实际上,价电子与本身原子核的距离和与相邻原子核的距离是同数量级的。所以,在本身原子核与相邻原子核的共同作用下,价电子不再分别属于各个原子,而为晶体中各原子所共有,这种情况称为价电子共有化运动。量子力学说明:由于价电子的共有化运动,重叠在一起的简并能级将分裂为一系列相互之间相差极微的能级形成的能带,如图 1-3 所示。价电子处于价级分裂后的那些能级上,这样的能带称为价带,价带的宽度约几个电子伏特。如果价带中所有的能级都按泡利不相容原理填满电子,就成为满带。

应该注意到,激发能级也同样可分裂成为能带。一般来讲,激发能带中没有电子,称为空带,但是价电子有可能经激发后跃迁到空带中而参与导电,所以空带又称为导带或自由带。在满带与导带之间不存在能级,这一能量间隔称为禁带。

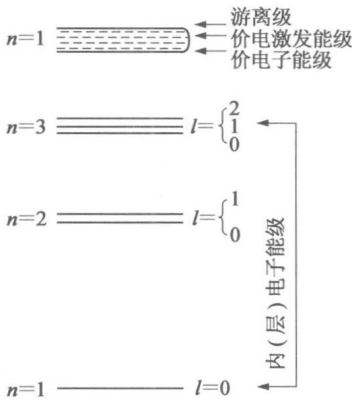


图 1-2 镅原子的能级简图

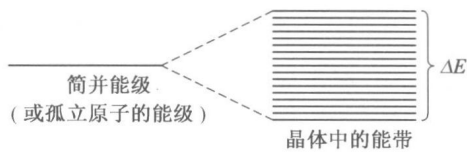


图 1-3 能级的分裂

一般情况下,电子不可能停留在禁带中。根据近代的能带理论,物质的导电性取决于价带是否填满、禁带是否存在,以及禁带宽度等因素。半导体的禁带宽度一般比较小,视晶体结构而有所不同,可以用实验方法来测定,也可以根据量子力学加以计算。例如,半导体锗的禁带宽度 E_g 为 0.75eV,半导体硅的 E_g 为 1.2eV,其他纯净半导体的 E_g 也都在 1eV 左右,这些半导体的能带结构简图如图 1-4(a)所示。

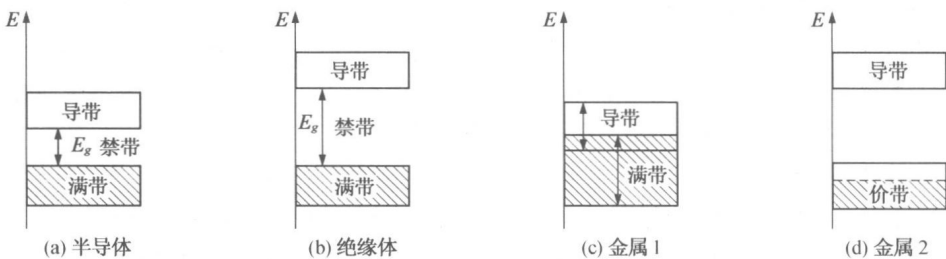


图 1-4 晶体的能带结构简图

绝缘体的能带结构与半导体的相似,不过绝缘体的禁带远较半导体的宽,如图 1-4(b)所示。在金属导体中,可能有两种情况:一种是导带下面的部分能级与价带的上面部分能级相互重叠,因而没有禁带,如图 1-4(c)所示;另一种是在单价金属中,价带中只有一部分能级占有电子,如图 1-4(d)所示。因此,即使价带与导带并不叠合,也能导电。

1.2.2 半导体的导电原理

由前所述,纯净半导体的禁带一般都比较窄,在绝对零度时,能带结构如图 1-5(a)所示,满带中填满电子而导带中没有电子,在外电场作用下,如果满带仍是填满电子的,外电场不能改变满带中电子的能量状态,也就不能增加电子的能量和动量,因而不能产生电子的定向运动,不会产生电流。如果加强电场,或者利用热或光的激发,使满带中获得足够能量的电子能越过禁带宽度 E_g 而跃迁到导带上去[图 1-5(b)],半导体就能够导电。

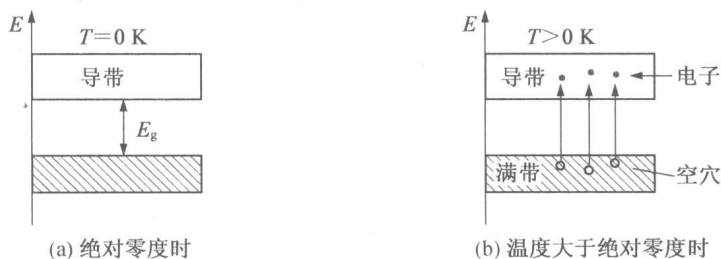


图 1-5 本征半导体能带结构简图

应该指出,这时半导体中的载流子,不仅有从满带激发到导带的电子,还有在满带中留下的空穴(价带顶部的空能级)。如果人们用 n 和 p 分别代表导带电子和满带空穴的浓度,显然,这时 $n=p$ 。人们把满足这一关系的能量激发称为本征激发,而把满足这种关系的半导体称为本征半导体,意思是其导电本领并未受到任何外来杂质或晶格缺陷的影响。

如果给纯净半导体掺入适当的杂质,也能提供载流子。人们把提供导带电子的杂质称为施主,而将提供价带空穴(即接收价带电子)的杂质称为受主。例如,在锗、硅这类处于周期表第IV族的元素半导体中,III族杂质硼、铝、镓、铟等是受主杂质,而V族杂质磷、砷、锑等则是施主杂质。这些杂质都以替位的形式存在于锗、硅晶体中,由此而形成的半导体称为杂质半导体。

1. 施主杂质与 N 型半导体

锗和硅是使用最广、最重要的半导体材料,具有金刚石型结构。其每个原子的最近邻有四个原子,组成正四面体。锗、硅原子最外层都有 4 个价电子,这些价电子轨道通过适当杂化,恰好与最近邻原子形成四面体型的共价键。

现在设想有一个锗原子为 V 族原子砷所取代的情形:如图 1-6(a)所示,砷原子共有 5 个价电子,于是与邻近锗原子形成共价键后尚“多余”1 个价电子。我们知道,共价键是一种相当强的化学键,也就是说束缚在共价键上的电子的能量是相当低的。如就能带而言,这便是处在价带中的电子。这个“多余”的电子不在共价键上,而仅受到砷原子

As^+ 的静电吸引,这种束缚作用是相当微弱的,只要给这个电子以不大的能量,就可使之脱离 As^+ 的束缚而在晶体内自由运动,即成为导带电子。由此可见,束缚在 As^+ 的这个“多余”电子的能量状态,在能带图上的位置应处于禁带中而又极接近导带底。就是说,由于掺杂,在禁带中出现了能级,我们称之为杂质能级。由施主元素引进的杂质能级称为施主能级,用 E_D 表示。束缚于 As^+ 周围的电子,就是处在施主能级上的电子。

由以上讨论可看出,施主能级具有向导带提供电子的能力,其名亦源于此。导带底能级 E_C 与 E_D 的差别 $E_1 = E_C - E_D$ 称为施主电离能。因为施主能级上的电子脱离束缚进入导带后,施主杂质就成为带正电的离子。可见,若施主能级为电子占据,则施主杂质为中性的施主原子;若施主能级空出,则相应于施主杂质电离成正离子。表 1-1 中列出了锗、硅的重要施主电离能,由表可见,其值一般都在 $0.05eV$ 以下。因此,室温已可提供足够的热能,使施主能级上的电子跃迁至导带而施主被电离。

要说明的是,在掺杂浓度不高时,杂质原子之间的距离是远远大于硅、锗等母体晶格常数的,相邻杂质所束缚的电子相隔很远,互不干扰,可以看成是彼此独立的。因此,它们的能量相同,表现在能带上便是位于同一水平上的分立能级,如图 1-6 (b) 所示。

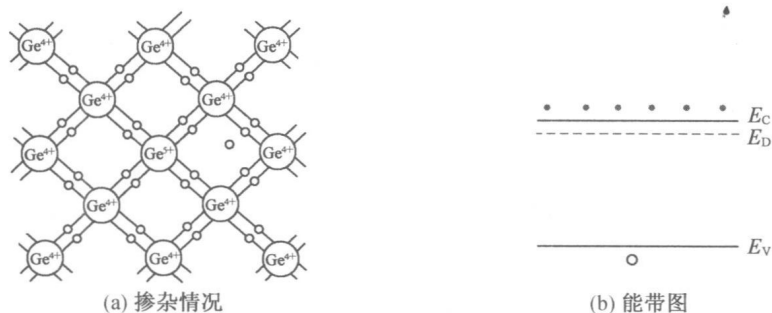


图 1-6 N 型半导体

显然,在掺入施主杂质后,半导体中的电子浓度增加,即 $n > p$,半导体的导电性以电子电导为主,故称为 N 型半导体,施主杂质因此称为 N 型杂质。在 N 型半导体中,电子又称多数载流子(简称多子),而空穴则称为少数载流子(简称少子)。

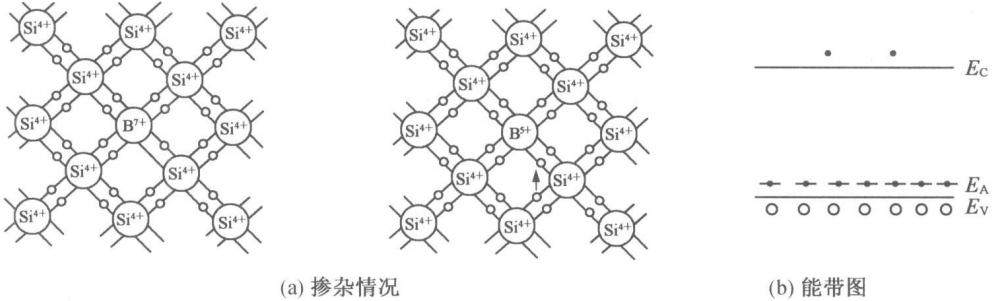
表 1-1 锗、硅中的浅杂质能级(电离能 E_1 以 eV 为单位)

杂质元素	施主 ($E_1 = E_C - E_D$)			受主 ($E_1 = E_A - E_V$)			
	磷	砷	锑	硼	铝	镓	铟
锗	0.012	0.013	0.0096	0.01	0.01	0.011	0.011
硅	0.045	0.049	0.039	0.045	0.057	0.065	0.16

2. 受主杂质与 P 型半导体

下面我们以硅中掺硼为例,来讨论受主杂质的作用。硼原子只有 3 个价电子,与邻近硅原子组成共价键时尚缺 1 个电子。在此情况下,附近硅原子价键上的电子不需要增加多大的能量就可以相当容易地填补硼原子周围价键的空缺,而在原先的价键上留下空

位,这也就是价带中缺少了电子而出现了空穴,硼原子则因接受了一个电子而成为负离子,如图 1-7(a)所示。图中还示意地画出了空穴在晶体中如何运动。这类杂质由于能接受电子而被称为受主,上述过程所需要的能量就是受主电离能。与施主情形类似,受主的存在也在禁带中引进能级,用 E_A 表示,不过 E_A 的位置接近于价带顶 E_V , $E_i = E_A - E_V$ 就是受主电离能,如图 1-7(b)所示。



(a) 掺杂情况

(b) 能带图

图 1-7 P 型半导体

在掺杂浓度不高时, E_A 也表现为能量相同的一些独立能级。显然,受主能级为电子所占据,对应于受主原子电离成负电荷的离子,而空的受主能级,则对应于中性受主原子。锗、硅中的一些重要受主杂质及其电离能也列于表 1-1 中。人们注意到,受主电离能与施主电离能并无数量级的差别。在掺入受主的半导体中,由于受主电离,使 $p > n$, 半导体的导电性以空穴导电占优势,因而称之为 P 型半导体,受主杂质亦称 P 型杂质。在 P 型半导体中,空穴是多子,电子是少子。

3. 补偿杂质作用

当半导体中既有施主杂质,又有受主杂质时,半导体的导电类型就主要取决于掺杂浓度高的杂质。当施主数量超过受主时,半导体就是 N 型的;反之,受主数量超过施主,则为 P 型。更具体地讲,在 N 型半导体中,单位体积有 N_D 个施主,同时还有 N_A 个受主,但 $N_A < N_D$, 这时施主放出的 N_D 个电子首先将有 N_A 个去填补受主造成的缺位,所以只余下 $N_D - N_A$ 个电子可以电离到导带,而成为导电载流子,如图 1-8 所示。

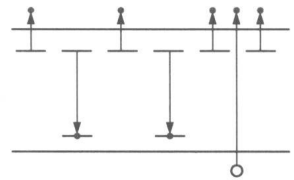


图 1-8 杂质补偿图

这种受主和施主在导电性上互相抵消的现象,叫做杂质补偿。在有杂质补偿的情况下,决定导电能力的是施主和受主浓度之差。

4. 深能级杂质

以上所讨论的施主和受主杂质,由于其电离能很小,能级距导带底或价带顶很近,故常称为浅能级杂质。浅能级杂质往往是半导体材料中决定导电性的主要杂质。

在半导体中,还有一些其他杂质也具有施主或受主的性质,但在禁带中引进的能级距导带底或价带顶较远而比较接近禁带中央,常称为深能级杂质。图 1-9 所示画出了硅中金的深能级,金在导带以下 0.54eV 处有一个受主能级,在价带以上 0.35eV 处有一个施主能级,这是深能级杂质的典型例子。深能级杂质大多是多重能级,如金在硅中就是两重能级,它反映杂质可以有不同的荷电状态。这两个能级中,在都没有电子填充的情

况下,金杂质是带正电的,当受主能级有一个电子而施主能级空着时,金杂质呈中性;当施主能级和受主能级都有电子占据时,金杂质是带负电的;当受主空出而施主有一个电子时,正是金原子既未施出电子又未接受电子的原始状态。

深能级杂质在半导体中起着多方面的作用。例如,它可以是有效的复合中心而使载流子的寿命大大降低;可以成为非辐射复合中心而影响发光效率;也可以作为补偿杂质而大大提高材料的电阻率。

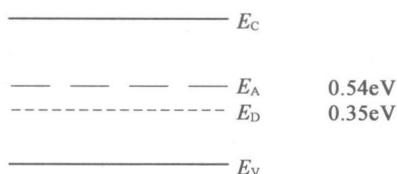


图 1-9 硅中金深能级

1.2.3 载流子

1. 热平衡载流子

在半导体中,由于杂质和满带激发电子的存在,使导带产生电子或满带产生空穴,这些激发的电子和空穴致使半导体导电,常统称为载流子。

在一定的温度下,若无其他外界条件的影响,半导体中的载流子数是依靠热激发而产生的。电子从不断热振动的晶格中获取一定的能量,由低能量的量子态跃迁到高能量的量子态。例如,电子从价带跃迁到导带形成导电的电子-空穴对,或从杂质能级把载流子电离到导带或价带中去。与此同时,电子和空穴还存在着复合过程,即电子从高能态回到低能态,并向晶格放出一定的能量,从而使导带中的电子和价带中的空穴不断减少。在半导体中,载流子的产生过程和复合过程是互相联系的,如果半导体温度升高,载流子的产生率高于复合率,载流子的浓度就会增加。但由于电子和空穴浓度的增大,它们相遇的机会也多,复合过程也要增强。最后,这两个相反过程将建立起动态平衡,称为热平衡。处于热平衡状态下的导电电子和空穴称为热平衡载流子。

显然,不同的热平衡状态(不同温度)下,热平衡载流子的浓度是不同的。正是这个原因,半导体的性质往往对温度的依赖很灵敏。

2. 非平衡载流子

以上讨论的是热平衡状态下,半导体导带和价带中载流子的浓度分布情况。事实上,半导体的这种热平衡状态并不是恒定不变的,在外界条件(如光照、温度)的作用下,有可能使电子或空穴的浓度偏离平衡值,从而使半导体从平衡状态变为非平衡状态,由此而增加的载流子称非平衡载流子。半导体器件的许多重要效应,如PN结的整流作用、晶体管的放大作用、光电现象等都和非平衡载流子的产生、输运和复合等过程有关。

若以 n_0 、 p_0 表示平衡状态下电子与空穴的浓度,而以 n 、 p 表示非平衡状态下电子与空穴的浓度,则非平衡电子与空穴的浓度分别为 $\Delta n = n - n_0$ 和 $\Delta p = p - p_0$ 。在通常情况下,由于电中性的要求,非平衡电子和非平衡空穴的浓度相等,即 $\Delta n_0 = \Delta p_0$ 。在图1-10所示中,用虚线示意性地框出了非平衡载流子。

非平衡载流子在数目上对于多子和少子的影响是不同的。多子的数量一般很大,非平衡载流子通常不会对它的数目产生显著的影响。例如,室温下 $n_0 = 2 \times 10^{15} / \text{cm}^3$ 的 N 型硅中,空穴的浓度 p_0 只有 $10^5 / \text{cm}^3$ 。若加入 $10^{10} / \text{cm}^3$ 的非平衡载流子,虽然电子浓度的变化微不足道,但空穴的浓度却增加了几个数量级。因此,人们在讨论非平衡载流子时,通常最关心的是非平衡少数载流子。

3. 载流子的运动

在一定温度下,半导体内部的大量载流子即使没有外电场的作用,也在不停息地做无规则的、杂乱无章的热运动。这种热运动的速度虽然很快,但是在宏观上它们没有沿着一定方向流动,所以并不构成电流。如果由于某种原因,使得半导体的载流子沿某一方向运动的速度比别的方向快,或者沿某个方向运动的载流子的数目比别的方向多,那么就会引起载流子的宏观迁移并产生电流,这种情况称为载流子的定向运动。

半导体载流子的定向运动主要有两种方式,即漂移和扩散。载流子的漂移和扩散是半导体的两种导电机构。

(1) 载流子的漂移运动。当半导体加上电场后,导电载流子除了热运动外,还要受到电场力的作用,产生附加的定向运动。这种在外电场作用下载流子的定向运动称为漂移运动。由于电子带负电,空穴带正电,所以两者的漂移运动方向不同,电子沿反电场方向漂移,空穴沿电场方向漂移,如图 1-11 所示,但是形成的电流都沿着电场方向。

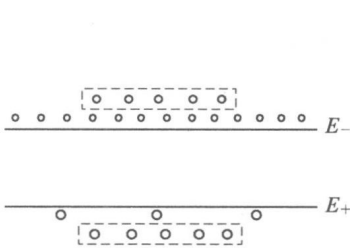


图 1-10 非平衡载流子示意图



图 1-11 载流子的漂移运动

在外电场作用下,载流子漂移所产生的电流称为漂移电流。半导体的漂移电流应该是电子漂移电流和空穴漂移电流的总和。但实际上,半导体的“多子”和“少子”在数量上有很大的差别,所以漂移电流可认为是“多子”漂移形成的。

(2) 载流子的扩散运动。在均匀掺杂的半导体中,如果材料所处的环境一致,则内部的载流子分布均匀,不会存在载流子的浓度梯度,因此一般不发生载流子的扩散。在存在非平衡载流子的情况下,如光照射到半导体的表面,则产生了非平衡载流子,此时在半导体内部,由表到里将形成非平衡载流子的浓度梯度,非平衡载流子在这种浓度梯度下将做扩散运动。

分子、原子和电子等微观粒子在气体、液体和固体中都可以产生扩散运动。只要微观粒子在各处的浓度不均匀,由于粒子的无规则热运动,就可以引起粒子由浓度高的地